

鉄道現場における Wi-SUN を利用した状態監視システムの適用可能性の検証

岩澤永照[†] 羽田明生[†] 流王智子[†] 川村智輝[†] 野末道子[†] 川崎邦弘[†]

我が国の鉄道インフラの老朽化が問題となっている。老朽化した鉄道インフラの監視を目的として、無線センサーネットワークを利用した状態監視システムの研究が注目されている。また、鉄道現場においては、気象、地上設備、車両設備と様々な監視対象設備が存在する。本稿では、情報通信機構が開発した Wi-SUN センサーネットワークと M2M 基盤を利用した状態監視システムを対象として、鉄道現場への適用を模擬した試験を実施し、適用可能性の検証を行ったのでその結果を報告する。

1. はじめに

我が国の鉄道構造物の多くは戦前や高度経済成長期に建設されているため、鉄道インフラの老朽化が問題となっている[1]。また、地震や台風などの自然災害による被災の可能性が世界的にみても高いという報告がある[2]。これらの背景から老朽化した鉄道インフラを監視し、危険予知などの実現が喫緊の課題となっている。

近年、情報通信技術や先進技術を利用した、鉄道インフラの監視を目的とした状態監視システムの研究が進められている[3]。配線作業が不要などの理由から鉄道においては無線センサーネットワーク（以下、WSN）を利用した状態監視システムが特に注目されている。本稿で対象とする WSN を利用した状態監視システムの概要を図1に示す。センサーでセンシングしたデータは他のセンサーを介してルーターまで転送され、ルーターから公衆回線を介して状態監視データとしてデータベースサーバに転送され蓄積される。これらの状態監視データをリアルタイム表示や処理して異常検知などに活用する。

本研究では、情報通信研究機構が開発した Wi-SUN センサーネットワークと M2M クラウド基盤（現在はアイ・エス・ビーに技術移転）を活用した状態監視システム（以下 Wi-SUN を利用した状態監視システムと呼ぶ）を対象として、鉄道現場における適用可能性の検証を実施した。

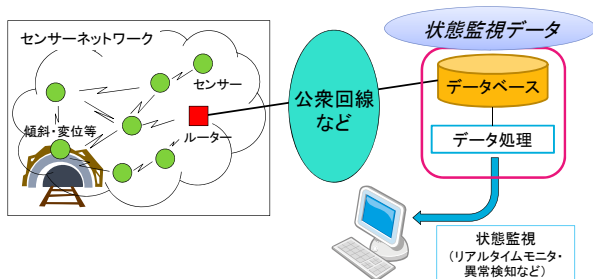


図1 WSNを利用した状態監視システム

Wi-SUN は ISM バンドである 920MHz 帯無線通信規格であり、マルチホップによる低消費電力が特徴である[4]。鉄道現場は線的に広がっているため、マルチホップによる長距離伝送が可能な Wi-SUN の特徴は鉄道現場に適している。また、無線伝送を利用したセンサーネットワーク（無線センサーネットワーク）では、センサーを搭載したノードがバッテリー駆動前提であることが多いため、バッテリー切れという問題が発生する。バッテリー切れはバッテリー交換によって解決できるが、橋梁やトンネルなどの鉄道構造物では足場を組んでバッテリー交換する必要のある場所も存在する。そのため、交換回数を抑制できる低消費電力という特徴は鉄道現場に適している。

本稿では、鉄道現場における Wi-SUN を利用した状態監視システムの適用可能性の検証を行うために実施した、鉄道沿線、盛土、車両での試験について報告する。

2. 関連研究

鉄道設備の状態監視システムの導入事例は存在し、最近では、走行中の新幹線における各機器の状態を示すデータを記録し、地上側に伝送し、車両の台車の健全性を監視するシステムを導入する予定である [5]。このシステムでは、一定期間毎の検査のみで把握していた車両の状態を走行中のデータで監視することで、安全・安定輸送の向上が期待できる。さらに、取得したデータを分析し活用することにより、検査の省力化が期待される。

また、センサーネットワークを活用して鉄道設備の状態監視を行う事例も存在する。例えば、文献[6]ではロンドン地下鉄のトンネルにおいて、トンネルの変形を監視する目的で傾斜計と変位計のセンサーを設置した事例を紹介している。この事例では、40m 程度の範囲内にセンサーを散在させ、センサー群の中心に設置したゲートウェイにデータを集約し、携帯電話網を経由して、離れた場所にあるケンブリッジ大学までデータを転送している。状態監視により、変形の程度や速度が捉えられていることから、トンネルへのセンサーネットワークの有用性が述べられている。文献

[†](公財)鉄道総合技術研究所
Railway Technology Research Institute

[7]では橋梁の橋脚の健全度評価を行う目的で橋脚上に傾斜計と加速度計のセンサーを設置し、無線伝送によりデータを収集している事例を紹介している。この事例では、2時間毎の傾斜と1日に3回の加速度のデータを収集している。約1年間の状態監視から健全度評価に有効であるデータを収集できることを確認している。

上述の通り、鉄道現場での状態監視システムは目的毎に研究開発されることが多く、鉄道現場全体の状態監視としての通信基盤に関する研究は少ない。そこで、本稿では、分野をまたがった試験を実施し、鉄道現場への適用可能性について検証した結果について報告する。

3. Wi-SUN を利用した状態監視システム[8]

Wi-SUN を利用した状態監視システム（アイ・エス・ピー社製）の概要を説明する。本システムの概要を図2に示す。監視対象設備に Wi-SUN センサーを設置し、それらが取得したデータを Wi-SUN ルーターに伝送する。Wi-SUN センサーから Wi-SUN ルーターにデータを直接伝送できない場合は、他の Wi-SUN センサーを経由してマルチホップ伝送を行う。Wi-SUN センサーからデータを取得した Wi-SUN ルーターは公衆回線を経由して M2M クラウド基盤にデータを転送する。今回は公衆回線に 3G 回線を使用している。さらに、蓄積されたデータはインターネットを介して表示アプリケーション（表示アプリ）で可視化することができる。

なお、本研究で実施した検証試験で使用した Wi-SUN センサーは加速度センサーを搭載したのみ実装されているため、以下では Wi-SUN 加速度センサーと呼ぶこととする。この Wi-SUN 加速度センサーでは、設定した時間間隔でのデータ取得し送信（定期送信）と設定した閾値を超えた時にデータ取得し送信（振動検知送信）することができる。また、1回のデータ取得は、サンプリング周波数 100Hz

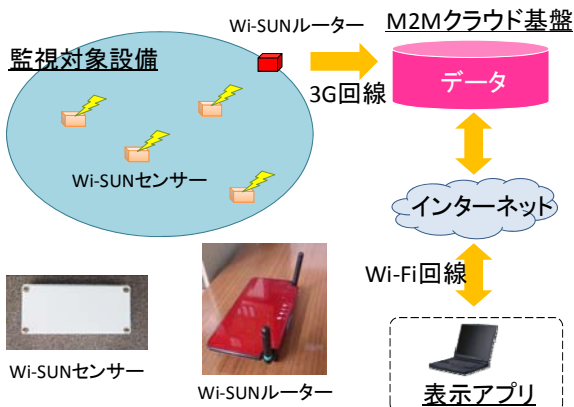


図2 Wi-SUN を利用した状態システムの概要

で20回のサンプリングを行い、それら20個のサンプルのうち18個のデータを取得後ただちにWi-SUNルーターに伝送する。

本稿では、このWi-SUNを利用した状態監視システムの鉄道現場への適用可能性を検証について報告する。

4. 鉄道現場への適用可能性の検証試験

3章で紹介したWi-SUNを利用した状態監視システムの鉄道現場への適用可能性を検証するための試験を実施した。試験を実施するにあたり、試験方法やパラメータを決定するために鉄道現場における現状のセンサー利用状況の調査を実施した。その実施結果を4.1節で述べる。4.2節では沿線における検証試験、4.3節では盛土における検証試験、4.4節では車両における検証試験について報告する。

4.1 鉄道現場における状態監視システムの要件整理

Wi-SUN センサーネットワークの鉄道現場への適用可能性を検証する試験を実施するにあたり、試験方法やパラメータを決定するため、鉄道現場における現状のセンサーの利用状況の調査を実施した。調査の結果から以下のことが分かった。監視対象設備毎に複数の計測項目があり、その監視目的によって、計測項目毎にデータ取得周期とデータ伝送周期が異なる。データ取得周期はセンサーが計測によってデータを取得する間隔、データ伝送周期はその計測したデータをセンサーがルーターに伝送する周期を示す。

ここでは、気象系[9,10]、地上設備系[7,11]と車両設備系[12]の3つの分野に分け、上記の調査結果を表1に整理した。なお、表1内の振動検知時というのは、加速度に対して閾値を設定し、その閾値を超えた時点を示す。この表1に基づき、後述する鉄道現場への適用可能性を検証する試験方法やパラメータを決定した。

表1 要件整理表

分野	監視項目	データ取得周期	データ伝送周期
気象系	風速・風向	0.5~1秒	0.5~1秒
	雨量	1~10秒	10分
	温度・湿度	10分	10分
地上設備系	盛土・切取の加速度	振動検知時, 1~10分	振動検知時, 1~10分
	橋梁の加速度	振動検知時, 1~10秒	振動検知時, 1時間ごと
	部材の温度	10分	10分
車両設備系	車体の加速度	振動検知時, 0.1~1秒	振動検知時, 0.1~1秒
	台車枠の加速度	振動検知時, 0.1~1秒	振動検知時, 0.1~1秒

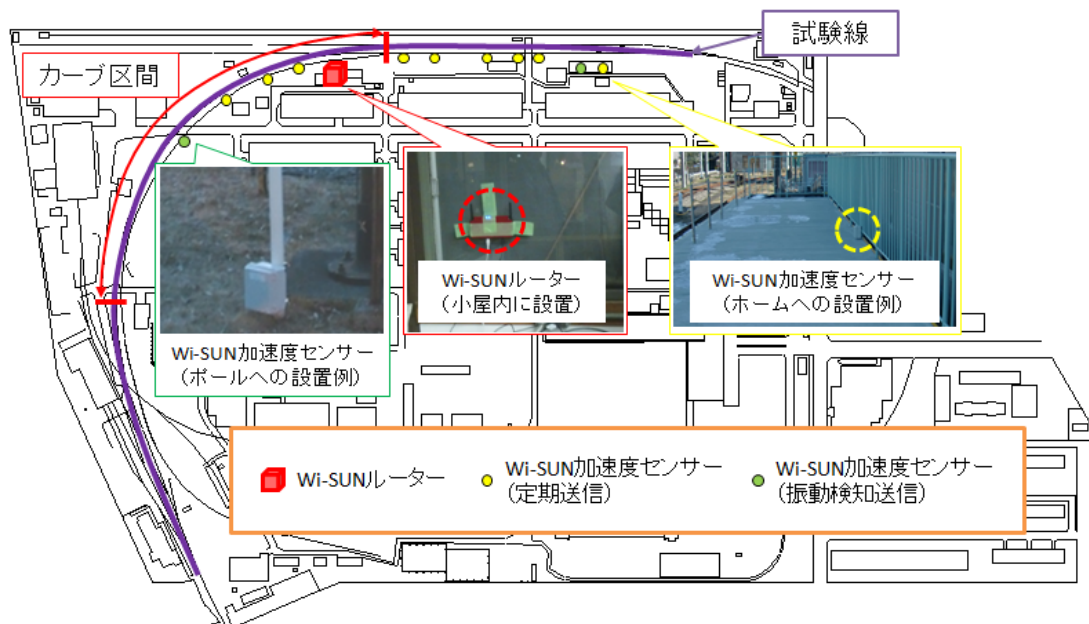


図3 Wi-SUN 加速度センサーの設置場所 (沿線)

4.2 鉄道沿線における検証試験

鉄道沿線における Wi-SUN を利用した状態監視システムの適用可能性の検証を目的として、鉄道総研の試験線沿線に Wi-SUN 加速度センサーと Wi-SUN ルーターを設置した (図3)。鉄道沿線での監視項目として、例えば表1の気象系や地上設備が挙げられる。そこで、図3に示すように、沿線のポールやホームに設置した。また、鉄道現場においては、地面に近い場所に設置されることが多いと想定されるため、地面に近い場所に設置することとした。本稿では、表1を参考に1分毎の定期送信のセンサーと振動検知送信に設定したセンサーを用意した。なお、11台のセンサーのうち9台を1分毎の定期送信、2台を振動検知送信に設定し、試験を実施した。

3日間の試験から定期送信の Wi-SUN 加速度センサーについては、約97%のデータ到達率という結果が得られた。また、振動検知送信のデータが取得できることも確認した。一方で、通信距離については、センサー間の通信可能距離が40m程度となった。これは、鉄道現場用に開発されたセンサーではないため、地面設置を想定したアンテナになっていないためだと考えられる。マルチホップ通信が可能なセンサーであるが、河川橋りょうの橋脚間などを考慮すると、最低100m以上の通信可能距離が求められると考えられる。計測項目についても、既に開発されている加速度のみで通信の確認を行ったが、今後は気象系センサーなどを導入して検証する必要がある。

4.3 盛土における検証試験

鉄道現場の地上設備である盛土において適用可能性の検証試験を実施した。鉄道総研の大型降雨実験装置に盛土を構築し、その盛土内に Wi-SUN 加速度センサーを設置した。

盛土においては、土砂災害などの緊急時にデータを収集できるかが重要となる。そこで、本稿では、雨による土砂災害発生時のデータおよび、その前後でデータが取得できるかについて着目して試験を実施した。そのため、土砂災害発生時を捉えるための振動検知送信とその前後でデータを取得するための定期送信の両方を行うことができるセンサーを使用した。

前述の通り、雨による土砂災害を模擬し、緊急時においてもデータを収集できるかを確認することとした。盛土における代表的な土砂災害として、斜面崩壊と地すべりが挙げられる。ここでは、急激な大雨による斜面崩壊と地下水が上昇することによる地すべりを模擬した試験を実施した。また、振動検知送信の閾値を決定するための予備試験として小型土槽を用いた試験2回(斜面崩壊と地すべりを各1回)、本節の検証試験として大型土槽を用いた試験2回(斜面崩壊と地すべりを各1回)の計4回を実施した。

まず、小型土槽における予備試験について説明する。小型土槽内に1000mm×1798mm×980mmの盛土を構築し、のり面に5台の Wi-SUN 加速度センサーとのり肩に2台の Wi-SUN 加速度センサーを埋めた(図4)。斜面崩壊を模擬した試験では、30mm/h以上の大雨を継続して散水し、地すべりを模擬した試験では、土槽の背面より注水し、さらに水位が盛土の高さの半分を超えた時点から10mm/h程度の散水を行った。小型土槽試験時の Wi-SUN 加速度センサ

ーの設定は、2分毎の定期送信とした。なお、図4の赤丸で示した Wi-SUN 加速度センサーのみ振動検知送信の設定を行い、その閾値を 0.1G とした。予備試験の結果より、閾値を 0.1G とすることで、盛土崩壊により Wi-SUN 加速度が落下した時点で振動検知送信を行うことが確認できた。そのため、大型土槽における試験では振動検知送信の閾値を 0.1G に設定することとした。

次に、大型土槽における試験について説明する。大型土槽内に 6000mm × 4993mm × 2723mm の盛土を構築し、のり面に 16 台の Wi-SUN 加速度センサーとのり肩に 4 台の Wi-SUN 加速度センサーを埋めた(図5)。小型土槽における試験と同様に斜面崩壊を模擬した試験では、30mm/h 以上の大雨を継続して散水し、地すべりを模擬した試験では、背面注水により水位が盛土の高さの半分を超えた時点から

10mm/h 程度の散水を行った。大型土槽試験時の Wi-SUN 加速度センサーは、2分毎の定期送信と振動検知送信をできるように設定した。

大型土槽試験の様子を図6に示す。盛土の崩壊とともに Wi-SUN 加速度センサーが落下したのが分かる。なお、Wi-SUN 加速度センサーが土中に埋もれた状態でもデータを伝送できることを確認した。しかしながら、今回の試験で使用した土を 10cm 程度 Wi-SUN 加速度センサーに被せることで 15dBm 程度の減衰を確認したことから、土に埋められたときの減衰量を定量的に把握する必要があると考えられる。また、大型土槽試験時における Wi-SUN ルーターまでのデータの到達率は、約 96%となった。試験で得られた加

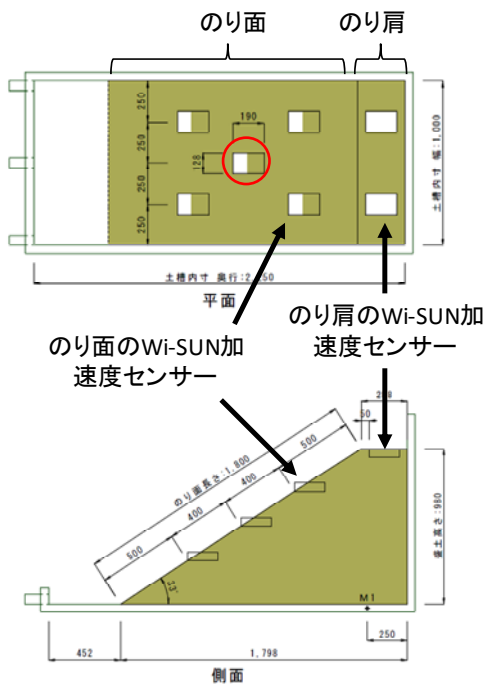


図4 Wi-SUN 加速度センサーの設置場所
 (小型土槽)

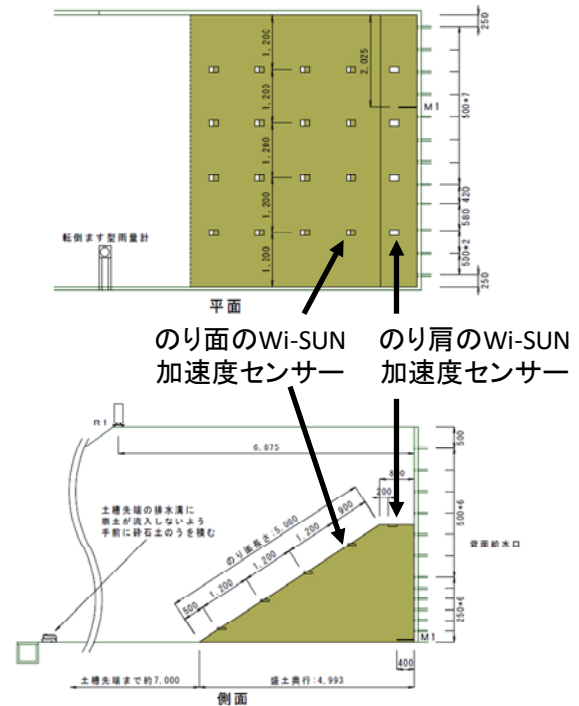


図5 Wi-SUN 加速度センサーの設置場所
 (大型土槽)

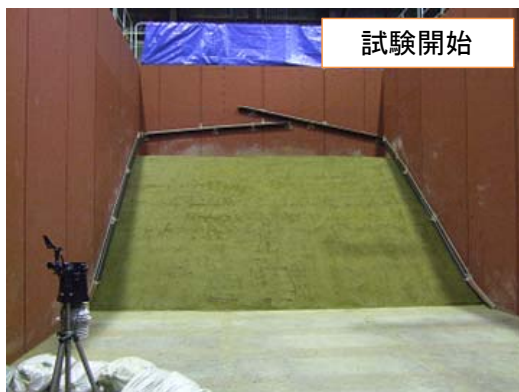


図6 大型土槽試験の様子

速度データの例を図7に示す．図7(a)はのり面中心付近のWi-SUN 加速度センサーのデータを，図7(b)はのり肩中心付近のWi-SUN 加速度センサーのデータを示している．Wi-SUN 加速度センサーが盛土崩壊によって落下する時点のデータを振動検知送信によって捉えられていることが確認できる．また，盛土崩壊前に浸水によって地盤が沈下していく様子が，のり肩のWi-SUN 加速度センサーのデータから分かる．

以上の結果から，Wi-SUN を利用した状態監視システムで，土砂災害時およびその前後のデータを取得できることを確認した．本試験では，Wi-SUN 加速度センサーを防水ケースに入れて，Wi-SUN ルーターは雨の当たらない場所に設置している．しかしながら，鉄道現場で使用する機器は雨だけでなく雪や列車振動など高い耐環境性が求められる．今後は耐環境性についても整理し，検証していく必要がある．

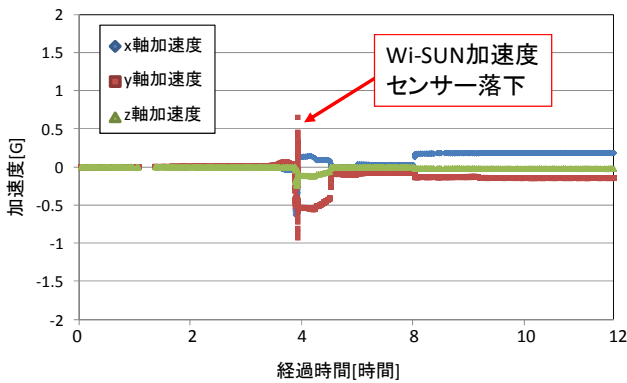
4.4 車両における検証試験

車両におけるWi-SUN を利用した状態監視システムの適

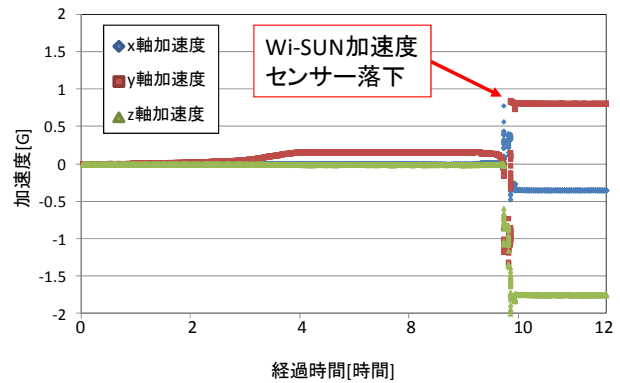
用可能性の検証を目的として，停車中および走行中の車両にWi-SUN 加速度センサーを設置し試験を実施した．車両においては，表1に示した通り，車内だけでなく台車からのデータを車内に設置されたWi-SUN ルーターに伝送できるかを確認することが重要である．そこで，Wi-SUN ルーターを運転台に設置し，Wi-SUN 加速度センサーを車内および台車に設置することとした．

鉄道総研構内の試験線において2両編成の試験電車に対してWi-SUN 加速度センサーを設置して試験を実施した．Wi-SUN 加速度センサーを，図8に示す通り，車内に11台，台車に8台設置した．これらWi-SUN 加速度センサーからのデータを運転台に設置したWi-SUN ルーターで収集した．停車中の列車および最高速度40km/hの走行中の列車でデータを収集できることを確認した．また，急加減速を模擬した運転パターンなども実施し，実施した全ての運転パターンにおいてデータを収集できることを確認した．

図9に定速走行時($v=10,40$)の台車に設置した加速度センサー1台分の結果例を示す．速度は列車速度を示している． $v=40$ の結果を見ると，定期送信以外に振動検知送信に



(a) のり面のWi-SUN 加速度センサー



(b) のり肩のWi-SUN 加速度センサー

図7 盛土試験結果

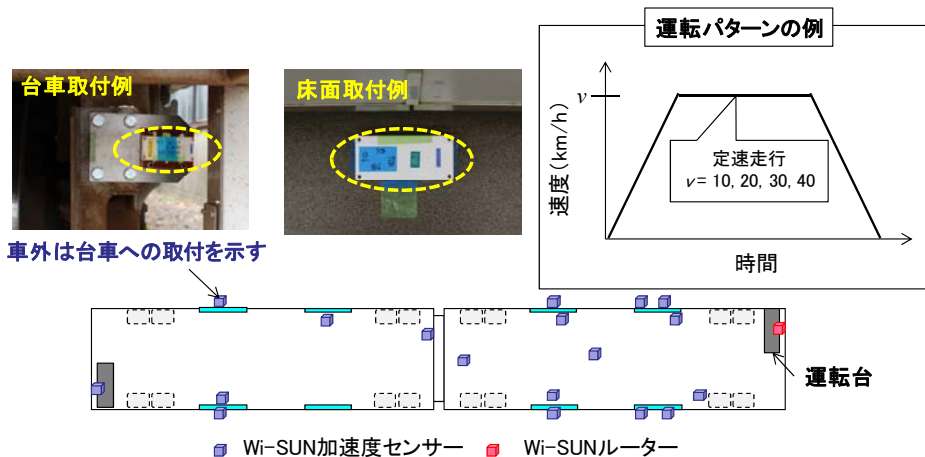


図8 試験電車におけるWi-SUN 加速度センサーの設置状況

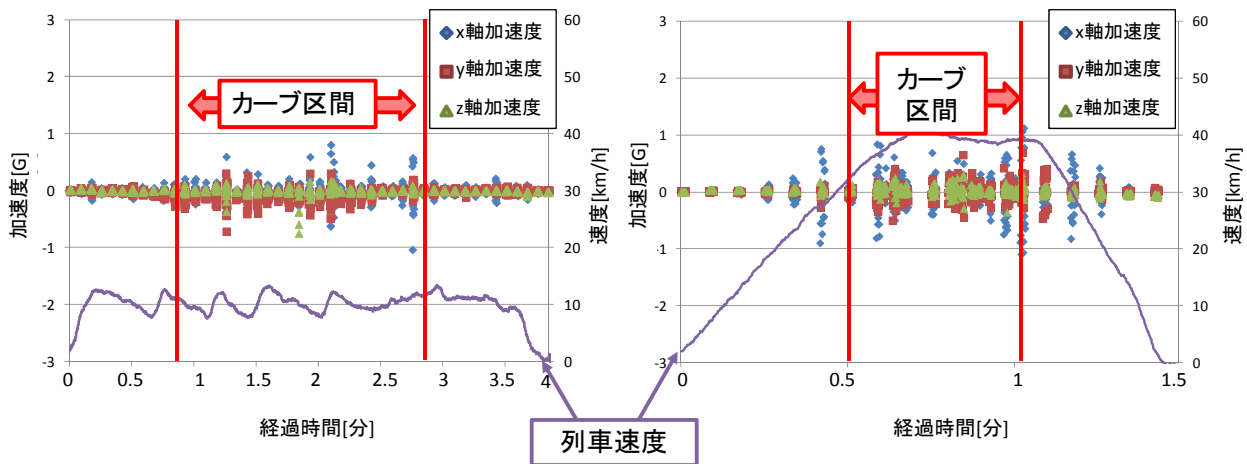


図9 車両試験結果

よるデータ収集が確認できる。カーブ区間において加速度が大きくなり、その区間で振動検知送信を行っている事が分かる。カーブ区間における振動が速さによる違いがあることが確認できる。

以上の結果から、車両の停車、走行時ともに車内外に設置された Wi-SUN 加速度センサーからのデータを車両内に設置された Wi-SUN ルーターを通して収集できることが確認できた。本試験の3日の走行試験において、Wi-SUN 加速度センサーと Wi-SUN ルーターが故障していると判断される事象は発生していないが、台車においては、図9に示す通り、1G以上の加速度がかかるため、前節同様、耐環境性の試験が必要となると考えられる。

5. おわりに

Wi-SUN を利用した状態監視システムの鉄道現場への適用可能性について検証試験を実施した。鉄道現場にあたって課題はあるものの、システムの考え方を適用できる可能性が高いと考えられる。本稿で報告した試験の結果から抽出された2つの課題と対策について以下に述べる。

1 つ目は、地面に設置した状態での通信可能距離の確保である。これは、アンテナの設計変更をすることで解決できると考えられる。2 つ目は、耐環境性の検証についてである。鉄道現場においては、雨や雪だけでなく、列車振動や海が近ければ塩害など、様々な影響が考えられる。今後は耐環境性についても整理し、それらの検証試験についても考えていく必要がある。

謝辞 本研究成果は、独立行政法人情報通信研究機構 (NICT) の委託研究「ソーシャル・ビッグデータ利活用・基盤技術の研究開発」により得られたものです。

参考文献

- 1) 国土交通省鉄道局: 第1回鉄道構造物の維持管理に関する基準

の検証会議 資料2, <http://www.mlit.go.jp/common/000995186.pdf> (2013).

- 2) 国連大学: World Risk Report 2014, <http://i.unu.edu/media/ehs.unu.edu/news/4070/11895.pdf>
- 3) 土屋隆司: 地上設備の状態監視保全技術と診断技術, 第26回鉄道総研講演会, pp.19-24 (2013).
- 4) インプレス SmartGrid ニュースレター編集部: 920IP(ZigBee IP) と Wi-SUN 標準 2015, インプレス社 (2014).
- 5) 東海旅客鉄道ニュースリリース, http://jr-central.co.jp/news/release/_pdf/000026944.pdf
- 6) 小林裕介, 平井力: センサネットワークで構造物を監視する, RRR, Vol.66, No.11, pp.2-5 (2009). <http://office.microsoft.com/ja-jp/word-help/CL010072933.aspx>
- 7) 阿部慶太, 神田政幸, 羽田明生, 岩澤永照, 関口琢己, 諸橋由治, 王林: 鉄道力学論文集: 鉄道工学シンポジウム論文集, No.18, pp.205-212 (2014).
- 8) アイ・エス・ピー社 HP: <http://m2m.isb.co.jp/>
- 9) 鈴木博人, 中北英一, 高橋日出男: 鉄道における雨量計の設置間隔と列車運転規制基準値の設定方法に関する考察, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol. 68, No.4, pp.1_409-1414 (2012).
- 10) 南雲洋介, 鈴木博人, 島村誠: 列車運転規制に用いる風速の評価方法に関する統計的検討, JR EAST Technical Review, No.45, pp.23-28 (2013).
- 11) 渡邊諭, 佐溝昌彦: 常時微動計測による橋脚基礎のヘルスマニタリングシステム, 鉄道総研報告, Vol.25, No.1, pp17-22 (2012).
- 12) 城取岳夫, 安永年広: 台車加速度による状態監視手法, 鉄道総研報告, Vol.25, No.8, pp.17-22, (2011).

<正誤表>

3章1行目

(誤)アイ・エス・ビー社 → (正)アイ・エス・ビー社・YRP-IOT社製

謝辞1行目

(誤)独立行政法人 → (正)国立研究開発法人